

文章编号:1000-694X(2006)04-0507-10

中国北方沙漠化过程及其防治研究的新进展

王涛¹, 陈广庭¹, 赵哈林¹, 董治宝¹, 张小曳², 郑晓静³, 王乃昂⁴

(1. 中国科学院 西区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 地球环境研究所, 陕西 西安 710075;

3. 兰州大学 力学系, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 国家 973 项目“中国北方沙漠化过程及其防治研究”(G2000048700)恢复了过去 2 ka 来我国北方沙漠化过程、演变、格局和驱动机制;揭示了土壤风蚀和沙尘起动的物理机制,确定了土壤风蚀容忍量、定量评价体系,风沙电场形成机理、分布规律和影响;确定了主要沙尘源区、沙尘暴移动规律和形成机制,建立了沙尘暴监测、预报预警方法和系统;研究了土壤碳、氮衰减规律及其对沙区植被的影响,揭示了沙漠化过程中植物的受损过程、适应对策和植被恢复机理,阐明了我国近 50 a 沙漠化的过程、成因、现状及其发展趋势,定量给出沙漠化空间变化态势,提出了重点地区防治沙漠化、社会经济与环境协调发展的模式和对策。为国家防沙治沙和干旱地区生态环境和社会经济可持续发展战略决策提供了科学依据。发展和完善了中国沙漠与沙漠化科学。

关键词: 研究进展; 沙漠化过程; 防治; 中国北方

中图分类号: X144 文献标识码: A

《国家重点基础研究发展规划》(973 项目)“中国北方沙漠化过程及其治理研究(G2000048700)”项目(实施期间为 2000 年 10 月至 2005 年 9 月),紧紧围绕我国北方沙漠化过程及其防治、区域生态环境建设与社会经济可持续发展中的基础理论问题,开展了多学科综合研究,是我国有关沙漠化过程及其防治对策的一次系统深入的研究,取得了一些创新性研究成果,具有重要的理论价值,对推动我国沙漠化防治具有重要指导意义;研究成果的推广也取得了较大的生态、社会和经济效益;使我国沙漠与沙漠化学科的理论体系和方法论更趋完善,提升了我国沙漠化防治的科学水平,推动了沙漠与沙漠化学科的发展,在国际干旱环境与区域可持续发展领域占有重要的地位。现将项目取得的主要成果分述如下。

1 沙漠化过程的自然与人文背景

确定了 2 ka 以来重点沙漠化地区水系和古绿洲迁移与土地覆盖变化格局^[1,2];恢复了历史时期沙漠化的基本过程、格局和演变序列,阐明了历史时期沙漠化发展的驱动机制^[3,4]。

(1) 重建了近 1 万年环境变化过程,丰富了中全新世以来在千年尺度上气候干旱化趋于加强的认识^[5,6]。依据冰芯、树轮、沉积物分析和冰川波动等

各单点气候代用资料,构建了近 2 ka 北方干旱区(包括东部沙区)及青藏高原的温度变化的轮廓和区域差异,证实了中国北方沙漠化区域中世纪暖期(公元 1150~1400 年)、小冰期(公元 1400—1900 年)和公元 3~5 世纪冷期的存在^[7]。

约从 1.4 ka BP 开始,气候条件逐渐改善,气温升高、降水增多,中国北方沙漠化地区逐渐进入中世纪暖期,东部植被覆盖度增加,沙地大部被固定成壤,原来的沙漠景观被干草原—疏林草原景观所代替。同时,证实将东部沙地归类为沙丘活化类型沙漠化土地是有依据的。这一过程大致延续了 300 多年时间。中世纪暖期结束后,气候干冷化趋势逐渐明显,最终出现小冰期,小冰期中三个明显的冷事件出现于 1500—1550 年、1650—1750 年和 1800—1850 年左右,它们被 1550—1650 年和 1750—1800 年的暖事件所分隔。气候环境的恶化,加上人类过度的开垦、放牧、樵采等经济活动,土地沙漠化日趋严重,中国北方沙漠化进入沙漠化强烈发展的时期。

沙尘暴的相关分析表明,贺兰山地区的树木年轮很好地记录了区域沙尘暴的爆发强度和频率。沙尘暴爆发较多年份树木形成窄轮,其中典型年份如 1953 年、1966 年、1973 年、1982 年都具有非常显著的对应表现。在树木年表基础上,分析重建了区域近 271 a 的降水变化,发现在贺兰山区的树轮记录

收稿日期:2005-12-15; 改回日期:2006-03-10

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(TG2000048705); 国家科技攻关计划项目“兰州市郊黄土丘陵雨养生态系统建植技术研究”

(2004BA901A15)资助

作者简介:王涛(1959—),男(汉族),上海市人,博士,研究员。主要从事沙漠环境与沙漠化研究。E-mail: wangtao@lzb.ac.cn

中很好地记载了整个西北地区广泛存在的20世纪20年代的干旱期。利用昌岭山树轮资料所建立的降水序列表现出的 $2.46 \sim 2.64$ a周期与公认的ENSO的周期 $2.5 \sim 7$ a一致,说明了腾格里沙漠南缘的降水可能受到太阳黑子活动以及ENSO的影响,同时也说明腾格里沙漠南缘地区不仅含有局部的区域气候信号,同时也受到全球大尺度气候变化的影响。

(2) 初步建立了历史时期沙漠化多学科交叉的综合研究方法^[8],明确了历史时期沙漠化过程的阶段性、沙漠化土地的格局及其影响因素。

根据地层记录、古城废弃、湖泊干涸、沙丘形成年龄、频降尘期等初步确定历史时期河西走廊沙漠化过程有南北朝、唐末五代和明清时期3次大发展时期。3次沙漠化大发展阶段,基本对应于2 ka以来气候明显偏冷的时期。

千年尺度气候变化趋势和百年尺度的波动变化,再加上人类活动影响的日益加强是导致中国西北干旱地区环境不断恶化的两个最为主要的原因。气候变化主导着千年和百年尺度的环境变化,而人类活动影响着百年和数十年尺度的土地退化,尤其是晚近沙漠化的主导因素。

对河西地区的分析研究表明,在清代早期,河西地区人口密度已经突破了干旱地带发生沙漠化的人口压力“临界指标”和水资源利用率超过40%的阀值,标志近300 a的沙漠化进程中人类活动所起作用开始上升为主要地位,成为导致河西地区生态环境变化的主导因素。19世纪中叶的鸦片战争后,东部草原进入统治者政策导向和驱使下的滥垦、滥牧、滥樵采的“三滥”时期,中国进入现代沙漠化时期^[9~16]。

2 沙漠化动力学过程及其调控

确定了沙粒气动起动的重要作用^[17],给出了沙粒起动风速的计算公式;建立了单宽输沙率实验值处理精度的完整法则、随机粒-床碰撞模型与反演方法,实现了对多场和多因素影响的宏观风沙流理论模拟;建立了风蚀容忍量(T值)模型;揭示了沙粒带电引发的风沙电场分布规律,阐明了沙尘暴对电磁波的影响机制。

(1) 应用粒子动态分析仪进行土壤风蚀研究^[18,19],揭示了气动起动对冲击作用相对较弱的小沙粒和细沙是重要的;风沙流中颗粒间的空中碰撞十分频繁,在冲撞起动过程中,在各种风速和粒径

条件下,冲击速度与起跃速度、冲击角与起跃角以及冲击能量与起跃能量之间均存在较好的相关性。在风洞实验基础上建立了含水沙粒(湿沙)起动风速的计算公式和风沙颗粒起动风速的计算公式。研究结果表明,计算颗粒的起动风速时必须考虑颗粒附近的气流湍流程度;通过风洞模拟实验建立了流沙和戈壁两种典型床面上的输沙通量廓线方程,指出沙粒的跃移活动的强度及其运动参数受床面性质的影响,而在建立输沙模型时,必须指明床面长度。

(2) 利用地面立体摄影测量技术,建立了金字塔沙丘近地表剪切风速分布规律,提出并阐述了局地环流对其形成的重要作用;提出复杂线形沙丘的新月形沙丘单体、线状排列的新月形沙丘单体、简单线形沙丘、复合线形沙丘及复杂线形沙丘5个发育阶段的划分。提出塔克拉玛干沙漠中部地区的高大复杂线形沙丘主要是由于简单以及复合线形沙丘的侧向移动形成的结论^[20]。

(3) 运用¹³⁷Cs技术系统地研究土壤风蚀与干旱半干旱地区环境示踪和沙尘暴的沙尘源,查明了研究区¹³⁷Cs的区域和剖面分布特征以及土壤表层¹³⁷Cs分布特征^[21,22],建立风蚀容忍量(T值)模型,确定了不同条件下的风蚀T值,制定了风蚀控制的T值方案,给出了中国干旱半干旱区风蚀气候因子的年变化在10和150之间,而中国北方干旱、半干旱区的风蚀率在 $600 \sim 8000$ t·km⁻²·a⁻¹,或 $0.4 \sim 5.3$ mm·a⁻¹之间的定量结果,并指出风蚀气候指数存在明显的区域差异并随季节和风向的变化而变化。在青海省共和盆地农田年风蚀率高出草地3倍,耕作过程使风蚀量增加 $5.74 \sim 8.80$ 倍。在内蒙古后山地区的农田累积风蚀深度通常超过10 cm,而草原累积风蚀深度不超过5 cm。指出,土地反复耕作是土壤加重风蚀的关键原因。

(4) 通过风沙流沙粒带电量的平均荷质比以及风沙电场变化规律的风洞实验测试,建立带电沙粒对电磁波传播影响的理论模型和定量分析,使得长期未能解决的无线电波衰减的理论预测低于实测结果约30多倍的问题得以圆满解决^[23];并给出沙粒所带电荷分布在沙粒表面局部区域的推论,进而证实非对称碰撞磨擦导致沙粒带电的推测;研究发现:忽略带电因素将有可能导致激光多普勒仪测得的风沙流中沙粒粒径的误差高达75%;为避免利用遥感技术测量沙尘暴相关量(如:沙尘暴的厚度、粒径及能见度等)时由于忽略带电因素所产生的误差,建立了主、被动遥感测量与沙尘暴中粒径和能见度及沙

尘暴厚度等的定量关系式。

(5)成功实现对多场(风场—温度场—电场—沙粒)耦合和多因素(沙粒带电、混合粒径、脉动效应、空中碰撞等)影响的风沙流的理论模拟^[24~27],有效揭示了地表热扩散产生的垂向风场对风沙流发展过程的影响、输沙量沿高度的分布的分层结构特征、混合粒径风沙流的特点等。通过获得的风沙流中沙粒的大量随机轨迹的统计分析,给出的不同摩阻风速下沙粒进入悬移或跃移运动状态的判据比现有判据更为合理;根据对跃移沙粒空中碰撞概率的有效计算,提出:沙粒间的碰撞(在空中和在床面)也是维持稳态风沙流的原因。

提出两种确定风沙流的沙粒起跃速度分布函数的方法^[28~31],即:粒-床碰撞随机理论模型和输沙率反演模型,成功给出具有一定普适意义(含沙粒粒径、摩阻风速)的沙粒起跃速度概率分布密度函数和击溅函数。其中,利用沙粒-床面碰撞随机理论模型确定的风沙流中沙粒起跃角速度概率分布密度函数是首次给出的。这一理论分析方法可避免现有实验手段对沙粒角速度判读的不确定性。这两种方法是对现有确定沙粒起跃速度分布函数方法和途径的有效补充,其结果有助于对沙粒起跃速度分布特性和规律的全面认识。

首次采用力学分析方法,给出蠕移运动输沙率计算的两个简单且便于工程应用的解析公式^[32,33]、测定了化学结皮和生物结皮的弹性模量和蠕变函数、给出防沙栅栏和草方格的合理几何尺寸等。

在风洞实验结果的基础上,进而考虑蠕移对单宽输沙率的贡献,得到了单宽输沙率的一经验公式,为处理风沙流结构的实验测量值提供了一简单并有效的途径^[34~43]。

3 沙尘暴的形成机制及其预警、预报方法

(1) 大规模网络观测与数值模拟相结合,研究了过去 43 a 亚洲沙尘每天的释放通量^[44],以及释放和沉降的“收支”状况,获得亚洲沙尘暴源区分布及各源区释放总量数据集^[45~47]。圈定了亚洲沙尘暴的 10 个主要源区分布^[48~50],其中非中国源区对沙尘暴的贡献约为 40%。

(2) 获得了过去 50 a 我国沙尘暴和强沙尘暴报道的准确时间序列^[51,52],完善了亚洲沙尘关键区域(中国沙漠、黄土高原、青藏高原、中国东北部沙地、中国沿海)沙尘输送高度、沉降形式、沉降量,大气粉

尘气溶胶理化特征和光学特征数据集;建立了数值模拟亚洲沙尘释放过程的数据集及参数化系统^[53];不同区域以及气象和气候因素对沙尘暴形成和发展的影响^[54],发现气候因素较沙漠化因素对亚洲沙尘暴发生更为重要的证据。

(3) 研究了分粒级沙尘粒子在风蚀中的释放过程,利用建立的地表数据集和参数化系统,模拟出 2001—2003 年春季亚洲大气沙尘在不同区域、不同高度上的质量浓度分布^[55],建立了可较准确描述亚洲沙尘循环过程的数值模拟系统;并以此为基础,以国家气象中心 T213 模式预报场为背景场,完成了与中尺度气象数值模式(MM5)的耦合,结合卫星沙尘暴反演的系列产品,建成了我国沙尘暴区域中尺度数值预报业务系统。同时一个以常规气象要素为对象的沙尘暴常规预报专家系统也已建立,并投入业务运行。

(4) 通过评估过去 50 a 我国地面太阳辐射的变化,发现我国大部分区域地面总辐射的下降趋势,以及我国可能的气溶胶散射较强的特点;并以建立的亚洲沙尘循环过程数值模拟系统为基础,分析并取得了沙尘气溶胶的物理和辐射特性数据集^[56],建立了沙尘气溶胶辐射特性模型,发现东亚气溶胶的高散射、低吸收特点和证据,根据粉尘辐射特征参数和浓度空间分布,进一步指出粉尘导致的陆地增温效应可伴随有大气层顶从 $-4 \sim +10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐射强迫^[57],海洋冷却效应可伴随有大气层顶从 $0 \sim -4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐射强迫。欧亚大陆和临近海洋因为粉尘导致的海陆热力差异变化,被发现可以触发和调节亚洲冬季风环流的快速和不稳定的变化^[58~63]。

4 沙漠化的生物学过程与植被恢复重建机理

(1) 土壤中 N、P、S 通常吸附在物理性粘粒表面,与粘粉粒结合的有机碳和全氮含量分别是粗沙组分有机碳和全氮含量的 6.7 倍和 5.7 倍,是极细沙中含量的 4.5 倍和 4.1 倍。与土壤粘粉粒结合的有机碳为稳定的腐质碳,与土壤沙粒结合的有机碳为不稳定的颗粒碳。土壤沙化过程中,随着土壤粘粉粒的吹蚀而急剧下降,随着沙漠化程度的增加,与沙粒结合的颗粒有机碳和全氮的含量显著降低,沙漠化程度增加一级,颗粒有机碳、氮含量平均下降 $0.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.059 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[64]。

不同土地利用/覆盖下土壤有机碳、氮含量有很大差别,其含量大小的顺序是农田 > 草地 > 沙地。

其中,有机质含量草地和农田相近,而高于沙地1倍以上;沙漠化过程中,不同土地覆盖类型有机碳、氮的下降速率有很大差别。其中,从非沙漠化土地到严重沙漠化土地,有机质的衰减幅度是沙地(89.6%)>草地(89.0%)>农田(65.5%),全氮的下降幅度是草地(92.9%)>沙地(82.9%)>农田(72.8%),速效氮的下降幅度是草地(74.3%)>农田(69.0%)>沙地(36.0%)^[65,66]。

(2) 确定了植被恢复重建对土壤环境和碳截存的影响。无论是退化植被的封育恢复,还是人工植被的建设,都显著增加了土壤有机质的输入和有机碳含量,同时截存大气中的有机碳。根据我国北方沙漠化区划及遥感数据对我国不同时期沙漠化土地(0~50 cm 土层)的碳平衡进行了测算,确定:① 我国当前不同类型沙漠化土地碳的总储存量为855.45 Mt。近40余年来,沙漠化土地向大气释放的CO₂总量相当于150.03 Mt C,是其储存量的17.5%。平均每年有3.75 Mt C的碳以CO₂形式排放至大气中;② 我国荒漠化土地CO₂的净排放量为90.9 Mt C;即,沙漠化的治理使59.12 Mt C的CO₂得到了固存。如果所有沙漠化土地得到治理和恢复,并且发生逆转,即从严重沙漠化土地恢复至中等荒漠化阶段,中等荒漠化土地逆转成为轻度荒漠化土地,而轻度荒漠化土地逆转为潜在荒漠化土地等,我国沙漠化土地固存的CO₂将达到236.04 Mt C。③ 荒漠化土地对CO₂的排放对全球碳循环系统有很大影响^[67],我国沙漠化土地得到有效治理对改善气候环境,缓解全球气候变化带来的负面影响有重要意义。

过去,人们只讨论到工业化和森林砍伐对CO₂温室气体的贡献,这项研究指出:土地沙漠化过程中的CO₂排放,是大气CO₂的重要来源,治理土地荒漠化是减少大气CO₂含量,改善全球气候环境的重要环节。

(3) 科尔沁沙地50.5%的沙漠化土地是由草地过度放牧引起的^[68]。当牧草采食率持续高于55%时,草地开始发生退化,当牧草采食率持续高于70%时,草地迅速退化和沙漠化;草地退化沙漠化的主要机制是:过度啃食使植物光合作用面积减少,光合能力下降,导致用于覆盖地表和固定土壤的物质和能量减少,在家畜践踏和风的双重作用下,裸露的沙质地表发生风蚀并形成风沙流,进而引起更大范围的草地沙漠化。定量研究表明,过牧草地49%的裸地是家畜过度啃食引起的,其余51%是风蚀引起

的^[69]。

(4) 土壤沙化对作物产量的影响:一是导致作物前期营养生长速率缓慢;二是作物将相对更多的物质和能量用于根系生长;三是单位面积叶片数下降,光合面积减小,光合能力下降。在农田沙漠化过程中,随着土壤养分含量下降、持水能力降低、地温升高,作物的生育期发生改变,生长节律减缓,光合面积下降,最终导致作物生物产量和粮食产量下降^[70]。

为了适应沙漠化过程中环境的变化,植物往往会采取一些新的繁殖策略。如改变了体内物质和能量的分配、采取多花少果策略、改变繁殖方式以适应逐步恶化的环境。研究发现,植物的繁殖方式,物质和能量的生殖分配,与降水、风沙活动、植株年龄有密切关系。

(5) 在干旱半干旱沙区,由于植物所处演替阶段不同,其种子萌发和苗期生长对策有很大差异。不同植物的种子萌发对埋深的反应有很大差异^[71]。沙地植物种子萌发对埋深的反应与种子大小(重量)并不相关,无论大种子还是小种子,不同植物都有对覆土厚度反应敏感程度不同的现象;沙地植物种子萌发对水热环境条件较为敏感,但是,并非水热条件适宜,沙地植物种子都一次性全部萌发,沙地植物种子萌发存在明显的分批性^[72]。例如,沙地小画眉草在生长季降水适宜的情况下就存在多次成批萌发特性;在-0.3~-1.2 MPa 渗透势条件下,幼苗根系长度是白沙蒿>花棒>柠条,而至-1.8 MPa 以后则又变为柠条>花棒>白沙蒿。发芽后10 d,在-0.3~-0.6 MPa 渗透势条件下,幼苗长度是白沙蒿>花棒>柠条,但在-0.9~-1.2 MPa 的渗透胁迫下,3种植物的幼苗高度几乎完全相同,均为3~4 cm 左右;在-1.8 MPa 渗透势下白沙蒿已经完全停止生长,而柠条和花棒分别在-2.4 MPa 和-2.1 MPa 渗透势胁迫下才完全停止生长。基本规律:一是处于演替前期的植物其种子萌发对埋深的敏感程度强于演替后期的植物,且耐旱性弱的植物种子萌发对埋深的敏感性要高于耐旱性强的植物种子;二是处于演替前期的植物其种子萌发对水分的要求要高于演替后期的植物,因而在干旱地区前者对降水有较强的依赖性,后者能耐受一定的土壤干旱;三是处于演替前期的植物其苗期生长速度明显快于演替后期的植物,特别是根系生长速度更快;四是轻度干旱可以促进演替前期植物的根系生长,而对于较强干旱胁迫,演替后期的植物根系生长受

损程度较轻。

研究一年生短命沙生植物小画眉针对降雨等环境变化的生活史对策^[73]，结果表明，经过长期的自然选择，小画眉草已经形成了种子连续和分批萌发、密度自疏调节、优先发展根系、快速完成生命周期等一系列生活史对策，这些对策保证了恶劣环境中其种群的延续，可以认为是一年生短命植物生活史最优对策。

(6) 研究发现沙地植物逆境生理适应机制，主要有：①抗风沙的植物(如沙米)叶表皮层细胞的细胞壁厚，栅栏组织发达且排列紧密，海绵薄壁组织细胞少，海绵薄壁组织细胞有结晶体；茎的皮层发达，靠近表皮的皮层细胞由小而排列紧密的厚木质部细胞组成，皮层内部细胞由较大的薄壁细胞组成，木质部不发达；②耐干旱高温的植物(如冷蒿)叶片表皮层薄，栅栏组织发达且排列紧密，海绵薄壁组织不发达。其茎周皮有发达的木栓层，皮层不发达，木质部在茎的各种组织中占有较大的比例，导管散生分布于小的厚壁细胞中，髓不发达由大的薄壁细胞组成；③抗旱性强的植物(冷蒿)叶片水势低，相对含水量、束缚水含量和质外体水相对含量高，束缚水与自由水的比值(V_a/V_s)大，吸水能力和保水能力强，而抗旱性弱的植物(如差不嘎蒿)则相反；④抗旱性强的植物在逆境下体内蛋白质含量、脯氨酸含量、硝态氮含量、糖分累积(蔗糖、果糖、葡萄糖)均较快，渗透调节能力强，而抗旱性弱的植物则较慢；⑤抗旱耐高温的植物在逆境下丙二醛积累缓慢，膜透性稳定，即使受到损伤，也能在环境改善时迅速恢复，表现出细胞膜弹性较好，耐干旱高温能力差的植物则相反；⑥抗旱强的植物(如白草)保护酶SOD和POD活性高，在逆境下其活性增强，而抗旱性差的植物(如芦苇)则SOD和POD活性低，逆境下趋于下降。说明，高温干旱条件下，抗性强的植物其生理调节能力强于抗逆性弱的植物，是其对环境适应性强于后者的重要原因之一^[74,75]，这也是环境发生变化时，植被优势种演替的生理机制^[76]。

冷蒿种群具有耐干旱、耐践踏、耐土壤侵蚀、生根萌蘖能力很强的特点，因而在抑制草原群落放牧退化过程中起着十分重要的作用。研究发现，冷蒿的这种抗逆性是其形态、生理、遗传多样性的综合反映。

(7) 土壤动物和微生物种群的变化主要与土壤有机碳、氮、水分含量和温度变化密切相关，土地沙漠化不仅导致土壤环境的恶化，也是土壤动物和

微生物群落退化的原因。随土地沙漠化的发展，土壤动物类群和数量明显下降。

(8) 阐明了荒漠土壤种子库特征及其与地上植被的关系。结果表明，沙漠化对土壤种子库密度的影响明显大于地上植被，而对于土壤种子库组成的影响明显小于地上植被^[77]。

(9) 研究发现，沙地灌丛不仅可有效防止土壤表层的侵蚀，有利于土壤养分和水分的保持以及土壤的形成和发育，增强灌木群落在严酷的环境下保持较长的稳定性，而且随着土壤有机物质在灌丛下的逐渐积累，有利于土壤持水性能等性状进一步得到改善和一年生和多年生草本植物的定居和发育，促进沙地植被的恢复与重建，揭示了沙地灌丛的肥岛效应和种源作用^[78]。

(10) 对不同地区和不同程度退化草地封育效果有很大差别^[79]。半干旱地区严重沙漠化草地封育效果最明显，封育3 a后，物种数量、植被盖度、植株密度、草地土壤种子库总密度是未封育草地的8倍；在干旱地区，红砂+无芒隐子草荒漠退化草地封育1 a后，各样地植被盖度平均较放牧样地提高1.7个百分点，产草量增加218.8%。封育2 a后，植被盖度增加了6.3个百分点，产草量增加了750%，干旱年份其种子产量是放牧样地的371倍，但多雨年份围栏内差异不大；退化较轻的草地封育效果相对较差，而长期封育可能会导致植物生长不良，其中短期封育对草层高度和生物量的作用较大，长期封育对群落物种组成、生物多样性和密度的影响较大。

(11) 揭示了人工油蒿群落结构特征与演化规律和不同地带几种锦鸡儿属植物的光合、蒸腾特征的差异和机理，阐述了沙地人工植被的稳定性机制；建立了沙漠化过程中植被稳定性评价指标体系；阐明了人工防风固沙林的生态功能。

(12) 研究确定了沙地植被耗水规律，建立了定量估测模型。揭示了沙漠地区降水的入渗速率、荒漠植被的蒸散规律及其制约因素，阐明了半干旱地区主要乔灌木耗水量及水分平衡，初步确定了干旱地区几种植物的生态地下水位，提出了沙地主要植物耗水量尺度转换模型，确立了半干旱区不同土地覆盖土壤水分变化规律及其承载力指标^[80]。

(13) 从沙漠化生物过程角度阐述了典型地区沙漠化成因、过程及对策^[81]，提出了中国北方沙漠化防治的目标、原则和基本措施，提出了沙漠化地区植被建设应注意的三个问题：一是注意正确选择造林树种；二是注意造林的空间分布格局；三是注意工

程造林的环境效应,避免造林过程对环境的新破坏^[82~91]。

(14) 沙漠化防治和生态农业技术的引进、集成和推广^[92]。包括:①乡级“生态网”综合治理开发模式;村级“多元系统”综合整治模式;户级“小生物经济圈”治理开发模式;坡改梯、梯改水和发展节水灌溉为骨架的治理模式;多树种多形式多功能混交林配置和林产品开发模式;山水田林路综合治理林果草药杂多种经营经济沟模式;封飞造草灌桥管护用三结合治理模式;草沙林水路封补松造灌结合的连片治理模式;草灌封顶护塬工程护坡固沟治理模式;以退耕种草为主体,发展商品畜牧业的治理模式;干热河谷坝周低山区生态农业模式;干热河谷退化生态环境开发性治理模式;干热河谷不同类型岩土造林模式等13项生态环境综合治理与农业可持续发展模式;②引进优良品种58个,筛选出适宜推广的有16个,其中棉花品种1个、小麦品种2个、谷子品种2个、水稻品种1个、甘草品种1个、麻黄品种1个、花生品种1个、牧草品种10个、蔬菜品种3个、饲料牧草品种5个、其他品种15个;③集成和推广46项技术,包括:差不嘎蒿扦插固沙技术;小叶锦鸡儿直播造林技术;开沟造林技术;高杆造林技术;黄柳扦插固沙造林技术;农田防护林营造技术;沙地樟子松育苗和造林技术;草方格固沙技术;秸秆沙障建设技术;林地抚育技术;盐碱地碱茅栽培技术;紫花苜蓿、小冠花等牧草丰产栽培技术;草地施肥灌溉技术;草地补播牧草技术;草地合理放牧技术;沙地山杏栽培技术;沙地衬膜育秧技术和衬膜水稻栽培技术;沙地小麦丰产栽培技术;沙地水稻栽培技术;沙地米麦间种技术;麦瓜套种技术;麦后复种箭舌豌豆和大白菜技术;大豆丰产栽培技术;棉花丰产栽培技术;地膜栽培技术;沙地西瓜丰产栽培技术;沙地果树栽培技术;沙地草莓、花生、芦笋、黄花菜等经济作物栽培技术;温室蔬菜栽培技术;家畜越冬暖棚修建技术;封闭式猪圈修建技术;鸡散养和笼养技术;猪、牛的育肥技术;沙地甘草栽培技术等;④累计推广各类新品种120余种,总面积累计6.67万hm²。推广沙漠化治理与沙地农业开发近53.3万hm²,推动了试验研究区域生态建设和农业经济发展。

5 沙漠化综合防治战略与模式

(1) 建立了中国沙漠化土地类型、强度分级系统,利用2000年TM卫星遥感数据对北方沙漠化的现状进行^{多方数据}^[93]调绘,完成了一次覆盖北方11个

省区的沙漠化监测,新编出版了《中国沙漠与沙漠化图》(1:400万,地图出版社,2005年版)和《中国沙漠与沙漠化图集》的编制工作(出版工作正在进行)。

研究结果表明,我国北方沙漠化土地自20世纪50年代后期以来一直处于加速发展的态势,沙漠化土地年均发展速率从20世纪50年代到70年代中期的1560 km²提高到70年代中期到80年代后期的2100 km²,80年代后期到2000年则增加为3600 km²。到2000年我国北方沙漠化土地总体上仍呈现扩大的趋势,达到38.57万km²。沙漠化土地主要分布在半干旱雨养农业农牧交错带、绿洲灌溉农业带和草原放牧带^[94~97]。

在此基础上,建立了基于网络的中国北方沙漠化地区沙漠化信息综合数据库。

(2) 基于对典型区沙漠化发展趋势、自然环境变化、人类活动等因素的研究和分析,探讨了不同地区沙漠化的成因,并在定量分析沙漠化过程中人类因素贡献率方面也取得了一定的进展^[98~99]。人类活动干扰的土壤风蚀速度可以是自然状况下的4~10倍;随着沙漠化程度的加剧,所产生的在土壤养分、生物多样性和生物生产量等方面退化的加速也与自然条件下的情况相差3~10倍以上。同时,合理的人类活动,包括合理利用土地、采取各种沙漠化防治措施又可使沙漠化过程逆转。所以说,人为因素对沙漠化的发展与逆转过程都是起着绝对主导作用。近现代随着许多新技术的运用,人类因素对沙漠化贡献率可能超过80%^[100~107]。

(3) 从人文因子与自然因子叠加机理出发,提出了确定现代沙漠化过程中两种影响因子贡献率的新思路,建立了相应的概念模型和数学模型,并在沙漠化地区进行了应用^[108,109]。其中将人文因子对沙漠化的影响主要落实在对地表植被盖度改变方面,建立的数学模型是流沙面积变化模型和植被盖度变化模型组^[110]。在已知两期沙漠化普查数据,以及相应的自然和人文因子数据时就可以对模型组进行耦合求解,得出两种因子的贡献率大小。该方法是一种基于沙漠化机理的较严格的动力学研究方法,概念上比较清晰,建立的模型易于理解,计算过程透明,可信度高。

(4) 研究干旱区沙漠化土地与沙尘释放关系得出结论,沙漠化土地应是沙尘释放率最强的区域。20世纪50年代末和60年代初两期强沙尘暴的活跃期与“大跃进”和“三线”建设,西北地区人口的两次大规模迁移和垦荒行动相一致。干旱区土地表面

被扰动破坏后,可使土壤的风蚀模数比自然地表增强十几倍,甚至上千倍,这一结论可以很好地解释两个时期沙尘暴的频次随大风频次的增加而减少,而随月平均风速的减少而减少的异常趋势。

(5) 基于对北方沙漠化土地的现状及其发展趋势的认识^[111~113],提出沙漠化4大区29个小区的防治区划。

(6) 基于以上研究成果,提出了我国沙漠化防治的战略、方针和基本原则^[114,115]。

我国沙漠化防治的战略:把握西部大开发的有利时机,以全面建设小康社会为目标,协调沙漠化地区自然资源环境与人类活动的关系,建立既能防治沙漠化土地又能保障可持续发展的生态、社会和经济体系^[116,117]。

沙漠化防治的指导方针:保护优先,重点治理,合理利用,协调发展;沙漠化防治的基本原则:“以防为主,防治并举,突出重点,先易后难”的原则、“因地制宜、扬长避短,统筹规划、综合治理”的原则、“沙漠化防治与脱贫致富相结合”的原则和“宣传教育、政策引导与农民自愿相结合”的原则^[48]。

还提出了“打破行政和国家部门界限,构建沙漠化防治网络,按‘预防保护区’、‘生态控制带’和‘沙漠化防治圈’的网络布局”的政策建议。总结出了沙漠化防治的基本途径。

(7) 近50 a来,缺乏有效缓解经济活动对土地压力的措施,特别是制度和模式,是沙漠化治理成效不显著的主要症结。为此,把沙漠化治理与农村经济发展,劳动力产业转移有机结合起来,提出了沙漠化防治的生态经济模式,包括以沙漠化地区资源高效利用为主要内容的技术创新和技术传播、以沙漠化治理为主要内容的沙漠生态恢复、以农业工业化为主要内核的产业经济发展三个有机结合的构成部分。同时,针对我国当前沙漠化典型地区,进行了深入的实证研究,如内陆河流域的生态经济耦合发展模式、典型沙漠-绿洲地区的特色产业发展战略、农牧交错区基于农户的生态经济发展模式。另外,根据我国沙漠化治理的实际,提出了沙漠化治理的产权制度、激励制度、投资制度、水资源管理制度等制度安排。并且依据沙漠化发生、发展的客观规律,为不同地区的沙漠化治理和社会、经济、生态环境可持续发展提供了基本模式^[117~124]。

(8) 深入研究并揭示了方格沙障固沙原理和阻沙沙障原理。在方格沙障固沙原理的基础上,依托材料科学的新成果,发明多种固沙材料和方法,已应

用在沿海国防工程、高速公路、铁路及文物古迹——敦煌莫高窟等防沙治沙方面。结束了多年工程治沙方法和材料老化,止步不前,草方格一统天下的局面^[9]。

参考文献(References):

- [1] 颜耀文,陈发虎,王乃昂.近2000年来甘肃民勤盆地绿洲的空间变化[J].地理学报,2004,59(5):662—670.
- [2] 刘普幸,李筱琳.黑河下游额济纳旗绿洲生态环境变化特征及生态恢复与重建[J].水土保持通报,2004,24(5):74—77.
- [3] 薛娴.中国北方农牧交错区沙漠化发展过程及其成因分析[J].中国沙漠,2005,25(3):320—328.
- [4] 刘立超,王伟红,宋耀选,等.沙漠化过程与气候变化相互作用的研究进展[J].中央民族大学学报(自然科学版),2005,13(3):197—202.
- [5] 李栋梁.中国农牧交错带的气候特征与演变[J].中国沙漠,2002,22(5):483—488.
- [6] 尚可政,董光荣,王式功,等.我国北方沙区气候变化对全球气候变暖的响应[J].中国沙漠,2001,21(4):387—392.
- [7] 李明启,靳鹤龄,张洪.小冰期气候研究进展[J].中国沙漠,2005,25(5):731—737.
- [8] 王乃昂,赵强,胡刚,等.近2 kaBP河西走廊及毗邻地区沙漠化过程的气候与人文背景[J].中国沙漠,2003,23(1):95—100.
- [9] Gou Xiaohua, Chen Fahu, Yang Meixue, et al. Climatic response of tree-ring width at different elevations over Qilian Mountains, northwestern China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 61:513—524.
- [10] Jin Heling, Su Zhizhu. Holocene climatic change in Hushandake Desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16):1730—1735.
- [11] Liu Lianyou, Gao Shangyu. Wind tunnel measurements of adobe abrasion by blown sand: profile characteristics in relation to wind velocity and sand flux[J]. Journal of Arid Environment, 2003, 53: 351—363.
- [12] Zhang Hong, Wu Jianwei. A preliminary study of Oasis Evolution in the Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55:545—553.
- [13] Wang Nai'ang, Zhang Jianming. The age of formation of the mirabilite and sand wedges in the Hexi Corridor and their paleoclimatic interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14):1439—1445.
- [14] Yuan Yujiang, Jin Liya. Variations of the spring precipitation day numbers reconstructed from tree rings in the Urumqi River drainage, Tianshan Mts. Over the last 370 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14):1507—1510.
- [15] Yang Bao. Temperature variations on the Tibetan Plateau over the last two millennia [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14):1446—1450.
- [16] Shi Peijun, Wang Jin'ai. The risk assessment and management of duststorm distaste in China[A]. Second Asian Symposium on Risk Assessment and Management[C]. Kobe, 2001. 23—25.

- [17] 董治宝,王涛,屈建军.风沙物理学学科建设的若干问题[J].中国沙漠,2002,22(3):205—209.
- [18] 郑晓静,周又和.风沙运动研究中的若干关键力学问题[J].力学进展,2003,25(2):1—6.
- [19] 孟祥亮,严平,宋阳,等.风蚀容忍量研究进展及其若干问题的探讨[J].中国沙漠,2005,25(3):315—319.
- [20] 韩致文,董治宝,王涛,等.塔克拉玛干沙漠风沙运动若干特征观测研究[J].中国科学(D),2003,(3):255—263.
- [21] 严平,董光荣.青海共和盆地土壤风蚀的¹³⁷Cs法研究[J].土壤学报,2003,40(4):497—503.
- [22] 严平,高尚玉,董光荣.土壤颗粒组成影响¹³⁷Cs含量的初步实验结果[J].中国沙漠,2002,22(2):150—153.
- [23] 郑晓静,黄宁,周又和.风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J].力学进展,2004,34(1):56—57.
- [24] 顾正萌,郭烈锦.沙粒跃移运动的动理学模拟[J].工程热物理学报,2004,25(增刊):79—92.
- [25] 郑晓静,王萍.风沙流中沙粒随机运动的数值模拟[J].中国沙漠,2006,26(2):184—188.
- [26] 李万清,周又和,郑晓静.风沙跃移运动发展过程的离散动力学模拟[J].中国沙漠,2006,26(1):47—53.
- [27] 亢力强,郭烈锦.风沙跃移中颗粒冲击起动的数值模拟[J].自然科学进展,2004,14(2):145—149.
- [28] 谢莉,郑晓静.风沙流中沙粒起跃初速度分布的初步探讨[J].中国沙漠,2003,23(6):637—641.
- [29] 黄宁,郑晓静.风沙跃移运动中的Magnus效应[J].兰州大学学报,2001,37(1):19—25.
- [30] 何丽红,郑晓静,武建军.跃移沙粒起跳垂直速度分布函数的统计分析[J].兰州大学学报,2004,40(2):31—35.
- [31] 邢茂,郭烈锦.风沙稳定输运中起跳沙粒运动状态分布函数[J].工程热物理学报,2004,25(3):448—451.
- [32] 刘小平,董治宝.空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J].中国沙漠,2003,23(4):337—346.
- [33] 王洪涛,董治宝,钱广强,等.关于风沙流中风速廓线的进一步实验研究[J].中国沙漠,2003,23(6):721—724.
- [34] Huang N, Zheng XJ, Zhou Y H. A multi-objective optimization method for probability density function of lift-off speed of wind-blown sand movement [J]. *Advances in Engineering Software*, 2005, 37(1): 32—40.
- [35] He Q S, Zhou Y H, Zheng X J. Effects of charged sands on electromagnetic wave propagation and scattering [J]. *Science in China*, 2005, 35(3): 308—317.
- [36] Zhou Y H, He Q S, Zheng X J. Attenuation of electromagnetic wave propagation in sandstorms incorporating charged sand particles [J]. *European Physical Journal E-soft Matter*, 2005, 17: 181—187.
- [37] Xie L, Dong Z B, Zheng X J. Experimental analysis of sand particles' lift-off and incident velocities in wind-blown sand flux [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 6: 564—573.
- [38] Zheng X J, Xie L, Zhou Y H. Exploration of probability distribution of velocities of saltating sand particles based on the stochastic particle-bed collisions [J]. *Physics Letters (A)*, 2005, 341: 107—118.
- [39] Wang T, Zhang W M, Dong Z B, et al. The dynamic characteristics and migration of a pyramid dune [J]. *Sedimentology*, 2005, 52: 429—440.
- [40] Zheng X J, Wang Z T, Qiu Z G. Impact craters in loose granular media [J]. *The European Physical Journal*, 2004, 13: 321.
- [41] Wang Z T, Zheng X J. Theoretical prediction of creep flux in Aeolian sand transport [J]. *Powder Tech*, 2004, 139: 123—128.
- [42] Zheng X J, He L H, Wu J J. Vertical profiles of mass flux for windblown sand movement at steady state [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109—B1106: 1—10.
- [43] Zheng X J, He L H, Zhou Y H. Theoretical model of the electric field produced by charged particles in windblown sand flux [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109—D15208: 1—10.
- [44] 石广玉.沙尘暴研究中的若干科学问题[J].大气科学,2003,27(4):591—606.
- [45] 韩永翔.北太平洋地区春季粉尘的空间分布特征——观测及模拟[J],中国环境科学,2005,25:257—261.
- [46] 王宏,石广玉.2001年春季东亚—北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫[J].科学通报,2004,94(9):1933—2000.
- [47] 梅凡民.中国北方表土微团粒粒度分布及其对粉尘释放通量的影响[J].科学通报,2004,49(7):1776—1784.
- [48] 王涛,陈广庭,钱正安,等.中国北方沙尘暴现状及对策[J].中国沙漠,2001,21(4):322—327.
- [49] 宋连春,韩永翔,奚晓霞.中国沙尘暴月际时空特征及日韩黄沙的源地研究[J].大气科学,2004,128(6):1—7.
- [50] 韩永翔,奚晓霞.亚洲大陆沙尘过程与北太平洋地区生物环境效应——以2001年4月中旬中亚特大沙尘暴为例[J].科学通报,2005,95(23):87—93.
- [51] 牛若芸,薛建军,周自江.2002年我国沙尘暴天气特征分析[J].南京气象学院学报,2004,27(2):178—184.
- [52] 丁瑞强.近45年我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J].中国沙漠,2003,23(3):306—310.
- [53] 丁瑞强,王式功.中国春季的沙尘暴趋势变化及年代际变化[J].高原气象,2004,24(5):660—666.
- [54] 周自江.中国北方的典型强沙尘暴事件[J].科学通报,2003,48(11):1224—1228.
- [55] 李栋梁,王涛,钟海玲.中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测[J].中国沙漠,2004,24(3):376—380.
- [56] 沈志宝.中国西北大气沙尘辐射强迫特性的数值试验[J].过程工程学报,2002,2(增刊):264—273.
- [57] 王式功.中国沙尘天气的区域特征[J].地理学报,2003,58(2):193—200.
- [58] 赵光平,陈楠,杨建玲,等.环境及冷空气类型与宁夏沙尘暴落区的对应关系[J].中国沙漠,2003,23(6):642—645.
- [59] 屈文军.西风带研究的重要意义[J].海洋地质与第四纪地质,2004,24(1):125—132.
- [60] 韩永翔.中国沙尘暴月际时空特征及沙尘的远程传输[J].中国环境科学,2005,(增刊):13—16.
- [61] 刘哲民,魏文寿,周宏飞,等.中国西北沙尘源区与日本沉降区大气气溶胶粒子理化特征及对比[J].中国沙漠,2003,23(4):408—414.
- [62] Wang H, Shi G Y. Radiative forcing due to dust aerosol over east Asia—north Pacific region during spring, 2001[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(20): 2212—2219.
- [63] Wang S G. Regional characteristics of three kinds of dust

- storm events in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39:509–520.
- [64] 刘颖茹. 我国北方草原沙漠化过程中土壤 C、N 变化规律研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9):1604—1606.
- [65] 苏永中. 农田沙漠化演变中土壤性状特征及其空间变异性分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):210—217.
- [66] 苏永中. 农田沙漠化过程中土壤有机碳、氮的衰减及其机理研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 14(6):930—934.
- [67] 苏永中. 不同退化沙地土壤碳的矿化潜力[J]. *生态学报*, 2004, 24(1):372—378.
- [68] 苏永中. 放牧干扰后自然恢复的退化沙质草地土壤性状的空间分布[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3):369—374.
- [69] 赵哈林. 放牧胁迫下沙质草地植被的受损过程[J]. *生态学报*, 2003, 23(8):1505—1512.
- [70] 刘立超. 沙漠化过程中地表热量平衡的试验观测研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(专辑):33—38.
- [71] 赵哈林. 沙漠化过程中沙质旱作农田土壤环境的变化及其对生产力形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(4):1—4.
- [72] 赵哈林. 我国北方农牧交错带的草地植被类型、特征及其生态问题[J]. *中国草地*, 2003, 27(1):34—40.
- [73] 张景光, 张志山, 王新平, 等. 沙坡头人工固沙区一年生植物小画眉草繁殖分配研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(2):190—202.
- [74] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(4):372—376.
- [75] 周海燕. 荒漠沙生植物生理生态学研究与展望[J]. *植物学通报*, 2001, 18(6):1—5.
- [76] 马风云. 生态系统稳定性若干问题研究评述[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(4):401—407.
- [77] 赵丽娅. 草地沙化过程地上植被与土壤种子库变化特征[J]. *生态学报*, 2003, 23(9):1745—1756.
- [78] 苏永中. 几种灌木半灌木对土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7):802—806.
- [79] 朱志梅. 草原沙漠化过程中植物的耐胁迫类型研究[J]. *生态学报*, 2004, 24(6):1093—1100.
- [80] 朱志梅. 沙漠化过程中植物的变化和适应机理研究概述[J]. *内蒙古大学学报*, 2003, 34(1):103—114.
- [81] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 北方农牧交错区沙漠化的生物过程研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(4):309—315.
- [82] Zhao Halin. Desertification processes of sandy rangeland due to over-grazing in semi-arid area, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62:309—319.
- [83] Zhao Halin. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy farmland of Inner Mongolia[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 87:175—187.
- [84] Yulin Li. Specific leaf area and leaf dry matter content of plants growing in sand dunes[J]. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 2005, 46:127—134.
- [85] Zhang Jiyi. Community succession along a chronosequence of vegetation restoration on sand dunes in Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62: 555—566.
- [86] Zhang Jiyi. Grassland recovery by protection from grazing in a semi-arid sandy region of northern China[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2005, 48: 277—284.
- [87] Tonghui Zhang. Changes in topographical features and soil properties after enclosure combined with sand-fixing measures in Horqin Sandy land, Northern China[J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2005, 51(1):61—68.
- [88] Yang Jiading. Heat and drought tolerance of two willow species, *Salix gordejevii* and *Salix babylonica*: A comparative study[J]. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2004, 52:301—306.
- [89] Halin Zhao. Sheep gain and species diversity: in sandy grassland, Inner Mongolia[J]. *J. Range Manage*, 2004, 57: 187—190.
- [90] Zhang Tonghui. A comparison of different measures for stabilizing moving sand dunes in the Horqin Sandy Land of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58:202—213.
- [91] Zhang Tonghui. Grassland changes under stress in Horqin Sandy Land in Inner Mongolia, China[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2004, 47:307—312.
- [92] 李峰瑞. 封育对退化沙质草地土壤种子库和地上群落结构的影响[J]. *草业科学*, 2003, 12(4):32—40.
- [93] 吴薇. 中国北方农牧交错区沙质荒漠化灾害监测评价模型[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(1):97—105.
- [94] 王涛. 中国北方沙漠化土地时空演变分析[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(3):230—235.
- [95] 王涛. 近 10 年来中国北方沙漠化土地空间分布的研究[J]. *中国科学(D)*, 2004, 47(Supp. 1):78—88.
- [96] 王涛. 近 50 年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. *地理学报*, 2004, 59(2):203—212.
- [97] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(5):519—528.
- [98] 王涛, 杨保, Achim Braeuning, 等. 近 0.5 ka 来中国北方干旱半干旱地区的降水变化分析[J]. *科学通报*, 2004, 49(9):883—887.
- [99] 赵兴梁. 论北半球三大温带草原农垦与沙漠化的关系[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(5):446—451.
- [100] Wang Tao. Decadal-scale precipitation variations in arid and semiarid zones of northern China during the last 500 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(8): 842—847.
- [101] Wang Tao. Study of spatial distribution of sandy desertification in North China in recent years[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(Supp. 1):78—88.
- [102] Feng Jianmin. Land degradation in the source region of the Yellow River, northeast Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Environmental Geology*, 2004, 47: 459—466.
- [103] Han Zhiwen. Observations of several characteristics of aeolian sand movement in the Taklimakan Desert[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(1): 86—96.
- [104] Zhang Weimin. The gobi sand stream and its control over the top surface of the Mogao Grottoes[J]. *China Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2004, 63(3):261—269.
- [105] Liu Wei. Physicochemistry and mineralogy of storm dust and dust sediment in northern China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(5):775—783.
- [106] Qi Shanzhong. Land degradation in the Heihe river basin, northwest China: classification and evaluation[J]. *Annals of Arid Zone*, 2004, 43(4): 456—476.

- [107] Li Fengrui. Patterns of reproductive allocation in *Artemisia halodendron* inhabiting two contrasting habitats [J]. *Acta Ecologica*, 2005, 28: 57–64.
- [108] 王涛. 中国北方沙漠化的若干问题[J]. 第四纪研究, 2001, (1): 56–65.
- [109] 卢琦. 中国荒漠化灾害评估及其经济价值核算[J]. 中国人口与资源, 2002, 12(2): 29–33.
- [110] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 沙漠化过程中生物量损失的初步评估[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 345–365.
- [111] 王涛. 走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 1–3.
- [112] 王涛. 中国沙漠化研究[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(2): 7–12.
- [113] 肖洪浪. 干旱区沙地资源农业利用模式的经济生态综合评判[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 63–68.
- [114] 董光荣. 中国北方农牧交错带农业经营方向初探——以晋陕蒙甘宁青地区为例[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 428–438.
- [115] 王涛. 我国沙漠化防治中的科学研究[A]. 中国治沙暨沙产业研究[C]. 石油工业出版社, 2003. 59–67.
- [116] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——3 沙漠化研究和防治的重点区域[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 1–9.
- [117] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——4 沙漠化防治的战略与措施[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 115–123.
- [118] 王涛主编. 中国沙漠和沙漠化土地[M]. 石家庄: 河北科技出版社, 2003. 1–955.
- [119] 王涛主编. 中国沙漠和沙漠化图(1/400万)[Z]. 北京: 地图出版社, 2005.
- [120] 王涛, 张伟民, 汪万福, 等. 莫高窟窟顶戈壁带阻截和输导功能研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 187–190.
- [121] 王涛, 陈广庭, 董治宝, 等. 内蒙古巴林右旗沙漠化治理模式与效益分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 750–756.
- [122] 吴薇. 现代沙漠化土地动态演变的研究——以科尔沁地区为例[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. 1–121.
- [123] 石敏俊. 中国生态脆弱带人地关系行为机制模型及应用[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 165–174.
- [124] 陈广庭. 沙害防治技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 1–265.

Research Progress on Aeolian Desertification Process and Controlling in North of China

WANG Tao¹, CHEN Guang-ting¹, ZHAO Ha-lin¹, DONG Zhi-bao¹, ZHANG Xiao-ye²,
ZHENG Xiao-jing³, WANG Nai-ang⁴

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *Earth and Environmental Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China*;

3. *Department of Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*; 4. *School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The National Key Basic Project (973) “Process and Controlling of Aeolian Desertification in North China”(2000048700) has got the following research results: has reestablished the development, succession, situation and driving mechanism of aeolian desertification in North China during late 2000 years; has disclosed the physical mechanism of soil wind erosion and sand-dust moving; has determined the wind erosion tolerance capacity of soil; has found the formation mechanism, distribution rule and impact of wind blown electrolyte field; has set up the quantity evaluating system; has confirmed the source area, moving route and formation mechanism of sand-dust, and has established the monitoring, forecasting and for-alarming method and system of sand-dust storm; has studied the attenuation law of C, N in soil and its influence on desert vegetation; has showed the harmed process, adapted countermeasure and recover mechanism of vegetation during aeolian desertification process; has clarified the process, cause, status and development and trend of aeolian desertification in North China during late 50 years; quantificationally showed the spatial distribution and change of aeolian desertification, and has put forward the model and countermeasures of controlling aeolian desertification and coordinating the social economy and environment in typical areas. These results from the project provide the scientific theory for government to control aeolian desertification and make the strategy of sustainable development of arid regions economy and eco-environment, and also has enriched and developed the theory system of Desert Science.

Key words: research progress; desertification process; controlling; North China